doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.17.018

固态粪肥撒肥机破碎装置设计与试验

马壮红　牛　聪　陈　雨　郭佩杰　党革荣　陈　军　张　硕
（西北农林科技大学机械与电子工程学院，杨凌 712100）

摘要：针对当前固态粪肥机械化还田作业中存在的物料破碎不彻底、抛撒均匀性差等问题，设计了一种高效撒肥机破碎装置。综合运用强度设计理论、动力学分析与离散元（DEM）仿真技术，建立了破碎装置-粪肥颗粒相互作用模型，分析了关键作业参数对破碎效果的影响机理。利用 ADAMS 运动学仿真对破碎装置的锤片末端线速度与肥料喂入速度比（线速比）进行优化；在此基础上，采用正交试验与响应面法（RSM），以破碎率和损失率为评价指标，对锤片的长度、宽度及厚度进行多目标寻优。结果表明，最优参数组合为：线速比 0.47、锤片长度 177 mm、锤片宽度 47.5 mm、锤片厚度 4.4 mm。为验证优化效果，研制样机并开展了田间性能试验。试验结果表明：优化后的破碎装置在典型工况下的实际平均破碎率达 80.77%，较传统方式提升了 25%；田间实测平均损失率为 8.58%，满足作业质量标准要求，有效解决了结块粪肥易堵塞、难破碎的作业难题。该研究可为固态有机肥撒施装备的结构优化设计提供理论依据与技术参考。

关键词：固态粪肥；撒肥机；破碎装置；离散元；ADAMS；破碎率
中图分类号：S126；S223　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)17-0188-12　　**OSID**：

Design and Test of Solid Manure Spreader Crushing Device

Ma Zhuanghong　Niu Cong　Chen Yu　Guo Peijie　Dang Gerong　Chen Jun　Zhang Shuo
(*College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Aiming to address issues such as incomplete material fragmentation and poor spreading uniformity in current mechanized solid manure return operations, a high-efficiency spreading machine fragmentation device suitable for large-scale operations was designed. By integrating strength design theory, dynamic analysis, and discrete element method (DEM) simulation technology, an interaction model between the fragmentation device and manure particles was established to analyze the influence mechanism of key operational parameters on fragmentation effectiveness. ADAMS kinematic simulation was employed to optimize the ratio of terminal linear velocity at the hammer tip to fertilizer feed rate (linear velocity ratio). Building upon this, orthogonal experiments and response surface methodology (RSM) were applied to conduct multi-objective optimization of hammer length, width, and thickness, using breakage rate and loss rate as evaluation metrics. Results indicated that the optimal parameter combination was as follows: linear speed ratio of 0.47, hammer length of 177 mm, width of 47.5 mm, thickness of 4.4 mm. To validate the optimization, a prototype was developed and field performance tests were conducted. Field results demonstrated that the optimized crushing device achieved an average crushing rate of 80.77% under typical operating conditions, a 25% improvement over that of conventional methods. The measured average loss rate was 8.58%, meeting operational quality standards and effectively resolving the operational challenges of clumping manure causing blockages and being difficult to crush. This research can provide theoretical foundations and technical references for structural optimization design of solid organic fertilizer spreading equipment.

Key words: solid manure; spreader; crushing device; discrete element method; ADAMS; crushing rate

收稿日期：2026-01-08　修回日期：2026-04-09
基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFD1900304）和国家自然科学基金青年基金项目（32201677）
作者简介：马壮红（2000—），男，博士生，主要从事农业机械化设计研究，E-mail：Mazhuanghong@nwafu.edu.cn
通信作者：陈雨（1989—），男，副教授，博士生导师，主要从事智慧农业装备设计与控制研究，E-mail：jdxy73@nwafu.edu.cn

0　引言

我国畜禽粪污等有机肥资源丰富，推进其高效资源化利用是实施“有机肥替代化肥”行动及农业绿色发展的核心举措[1-4]。目前的施肥方式主要有人工施撒、无人机施撒、撒肥机施撒等，其中，固态粪肥抛撒机凭借作业效率高、适应性强等优势，已成为规模化农业生产的主要装备[5-6]。然而，传统撒肥机设计多依赖经验法，面对湿黏、易结块的固态粪肥时，常出现破碎不彻底、抛撒不均等问题[7-10]。因此，开发一种集高效破碎与均匀抛撒于一体的新型撒肥装置，通过结构优化解决湿黏粪肥易堵塞、难破碎的问题。

近年来，离散元法因在处理非连续介质问题上具有显著优势，已被广泛应用于肥料-触土部件相互作用机理的解析中，成为国内外学者优化撒肥装置核心部件的重要手段。在撒肥机研究领域，法国库恩公司[8]推出的 SLC 100 系列撒肥机通过“双螺旋输送 + 摆动锤片二次破碎”的创新结构，有效解决了肥料输送与均匀抛撒难题。山东农业大学王辛政[11]针对现有机械功能单一的瓶颈，研制了自走式固体有机肥收集-抛撒一体机，利用 EDEM 离散元仿真优化螺旋叶片参数，实现了撒布幅宽与均匀性的协同提升。胡永光等[12]针对茶园施肥需求，研制了一种偏心式可调倾角离心撒肥盘，基于颗粒运动轨迹建模与响应面法优化结构参数，在最优组合下将分布变异系数降低至 6.12%，为精准施肥装置设计提供了理论依据。谭辰[13]设计了一种应用于果园的有机肥条铺机，采用横向螺旋输送器对有机肥进行输送与抛撒，并通过调节撒肥间距适应不同果园行距。近年来，变量施肥装备进一步向结构参数与控制策略协同优化方向发展，周文琪等[14]通过双通道斜置式撒肥叶片单圆盘离心式变量撒肥机改善肥料分布均匀性，丁友强等[15]和王金峰等[16]则分别围绕处方图式稻麦变量施肥和水稻侧深变量施肥开展控制系统设计，提高了施肥量调控精度与作业适应性。综上所述，现有文献主要围绕肥料输送、抛撒轨迹、分布均匀性和变量施肥控制展开，对高湿度、高纤维含量固态粪肥在破碎过程中的力学行为缺乏系统性研究，尚未清晰揭示结块肥料在冲击作用下的破碎过程及破碎效果。

基于此，本文设计一种立轴式撒肥机破碎装置。综合运用强度设计理论、动力学分析与离散元（DEM）仿真技术，深入解析破碎装置与肥料颗粒的动态互作机理。通过构建非球形粘结颗粒模型还原湿黏粪肥物理特性，利用 ADAMS 仿真解析不同线速比下的锤片运动轨迹特征，确定最佳运动学参数。在此基础上，采用正交试验与响应面法（RSM），以破碎率和损失率为评价指标，构建锤片长度、宽度及厚度与作业性能的二次回归模型并进行多目标寻优，确立最优结构参数组合。最终研制样机进行田间性能试验，验证其在复杂工况下的破碎效果与作业稳定性，旨在实现装置对湿黏粪肥的高效破碎与低损抛撒，为提升我国有机肥施用装备的自主研发能力提供理论依据与技术支撑。

1　固态粪肥撒肥机破碎装置设计

1.1　整机结构与破碎装置设计

采用 Solidworks 软件建立固态粪肥撒肥机整机几何模型，如图 1 所示。整机主要由肥料抛撒装置、破碎装置及料箱系统构成，其中料箱系统包含牵引装置、肥箱、输送装置、排肥挡板及液压控制系统等核心部件。其中破碎装置采用锤片式结构[17]，主要由主轴、销轴、辐板及锤片组成。该装置布置于肥箱后方、排肥挡板前端，可对黏性肥料及其中混杂的砂石进行破碎，有效防止排肥口堵塞并保障撒肥均匀性。其中影响肥料破碎效果的主要因素包括装置转速、销轴数量、锤片尺寸、孔径及孔边距。

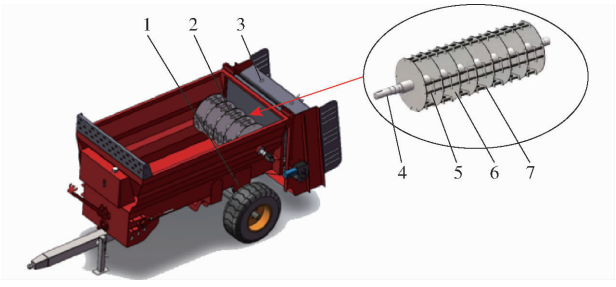


图 1　撒肥机几何模型

Fig. 1　Geometric model of fertilizer spreader

1. 料箱系统　2. 肥料破碎装置　3. 肥料抛撒装置　4. 主轴　5. 销轴　6. 辐板　7. 锤片

1.2　破碎装置动力学分析

破碎装置作为农业机械中的关键执行部件，对其进行受力分析，如图 2 所示，根据其受到的力 F_r、F_G和 F_N，其大轴直径设计需同时满足扭矩传递和抗弯强度要求。

为了得到符合强度设计的破碎装置，需要根据材料力学理论，计算符合强度设计的破碎装置主轴直径，轴直径 d 的计算公式为

$$d = \sqrt[3]{\frac{16T}{\pi\tau}} \tag{1}$$

式中　T——工作扭矩，N·m

τ——材料许用剪切应力，Pa

对于复合受力工况，应采用第 3 强度理论的组

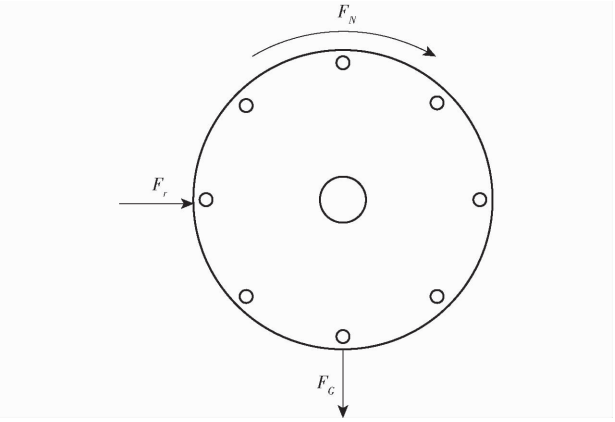


图 2 破碎装置受力示意图

Fig. 2 Schematic of forces acting on crushing device

合应力公式,即

$$d=\sqrt[3]{\frac{16\sqrt{T^2+M^2}}{\pi\tau}} \tag{2}$$

式中 M——工作弯矩,N·m

考虑农业作业的冲击载荷,引入安全系数 $n=2$ 后,修正公式为

$$d=\sqrt[3]{\frac{16n\sqrt{T^2+M^2}}{\pi\tau}} \tag{3}$$

要计算主轴直径,需要先计算破碎装置所受到的工作扭矩以及工作弯矩。传动系统扭矩计算公式为

$$T=\frac{P}{\omega}=Fr \tag{4}$$

式中 P——机械功率,W

ω——破碎装置角速度,rad/s

r——破碎装置主轴半径,m

F——物料对锤片的平均冲击阻力,N

结构件弯矩计算方法如下:农机工作部件弯矩计算需区分载荷类型,一般载荷类型分为均布载荷和集中载荷两种。根据破碎装置的实际工作情况,可将其看作受到肥料带来的均布载荷。

均布载荷工况,弯矩的计算公式为

$$M_{\max}=\frac{wL^2}{8} \tag{5}$$

其中

$$w=\frac{mg}{L} \tag{6}$$

式中 $M_{\max}$——主轴最大弯曲弯矩,N·m

L——破碎装置主轴长度,m

w——单位长度上的载荷,N/m

g——重力加速度,取 9.8 m/s^2

m——破碎装置总质量,kg

将式(6)代入式(5)可得

$$M_{\max}=\frac{mgL}{8} \tag{7}$$

经过上文分析可以得知破碎装置工作时的受力情况,以及破碎装置的质量情况。将式(4)与式(7)代入到式(3)中,可以得出符合强度设计的破碎装置主轴直径。

破碎装置在撒肥机执行撒肥作业时,其与待抛撒肥料的相对运动可分为两种运动:肥料沿前进方向的运动;在破碎滚筒的作用下随着破碎销轴做圆周运动。该运动状态如图 3 所示。

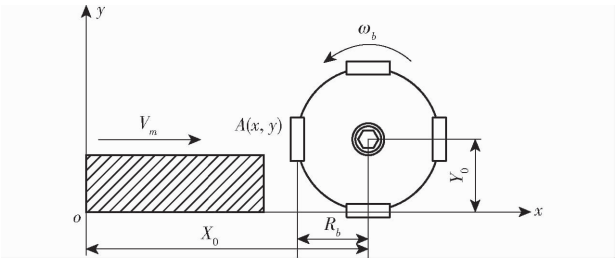


图 3 锤片工作时运动状态

Fig. 3 Motion state of hammer during operation

将原点 O 置于肥料模型中,点 $A(x,y)$ 为锤片最远端点中任意一点,运动轨迹参数方程为

$$\begin{cases}x=R_b\cos(\omega_b t)-V_m t\\ y=R_b\sin(\omega_b t)\end{cases} \tag{8}$$

式中 V_m——抛撒作业肥料的推进速度,m/s

t——撒肥机作业时间,s

R_b——破碎滚筒中心与销轴孔中心间距,m

ω_b——锤片工作时的旋转角速度,rad/s

对式(8)求导,得到锤片任意端点相对肥料的速度 V_0 为

$$V_0=\sqrt{V_x^2+V_y^2}=\sqrt{V_m^2+2V_mR_b\sin(\omega_b t)+\omega_b^2R_b^2} \tag{9}$$

式中 V_x——锤片端点相对肥料速度的水平 x 分量,m/s

V_y——锤片端点相对肥料速度的竖直 y 分量,m/s

假设肥料密度分布均匀,整个破碎过程由锤片与肥料开始接触时开始,直至锤片脱离肥块结束,此时锤片运动过程可看作相对于肥块做切向运动,同时产生微小角度摆动,其中锤片产生的摆动角度为 φ_s。

破碎锤片主要受力包括:肥料对锤片的切向阻力 f_m、锤片绕破碎滚筒中心 O 运转所产生的离心力 T_1、锤片绕销轴中心 O_1 运转时产生的离心力 T_2、锤片自身重力 G_k。锤片受力分析如图 4 所示。

锤片绕销轴做小偏角摆动的微分方程为[18]

$$\sum f_i d_i=J_{O_1}\frac{\mathrm{d}^2\varphi_s}{\mathrm{d}t^2}+m_s\omega_b^2R_0\sin\theta_s\sqrt{R_0^2+R_2^2+2R_0R_2\cos\varphi_s} \tag{10}$$

式中 f_i——机构各位置受到的单个外力,N

d_i——对应外力 f_i 到主轴回转中心的力臂,m

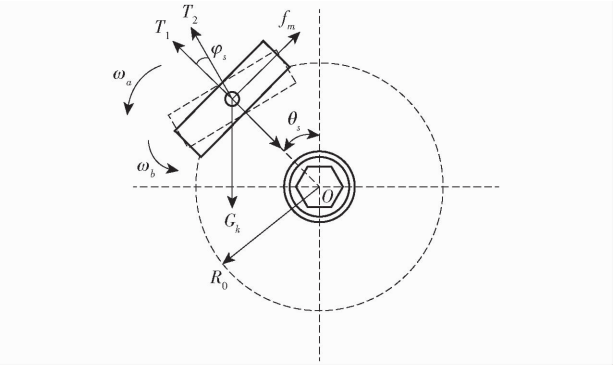


图 4　锤片工作时受力分析

Fig. 4　Force state of hammer during operation

J_{O_1}——主轴与锤片总成绕回转中心 O_1 的转动惯量，kg·m^2

m_s——单组回转锤片的等效偏心质量，kg

R_0——锤片绕自身销轴的偏心回转半径，m

θ_s——离心力作用线与力臂间的方位夹角，rad

R_2——主轴回转中心至锤片销轴的中心距，m

锤片绕销轴作微小摆动，由于轴套的作用此时 φ_s 接近于 0，则破碎肥料所需扭矩计算公式为

$$M = J_{O_1}\frac{\mathrm{d}^2\varphi_s}{\mathrm{d}t^2} + m_s\omega_b^2 R_0^2 \sin\theta_s \tag{11}$$

1.3　锤片运动轨迹仿真

锤片式破碎装置轮轴及锤片运动轨迹取决于破碎装置线速比 λ[19]（锤片线速度与肥料喂入速度之比）。当 λ 发生变化时，运动轨迹将相应改变，进而显著影响牛粪堆肥中结块肥料与砂石的破碎效果。应用 Solidworks 三维建模软件完成了破碎装置与肥料传送装置的建模与部件装配，在适当简化破碎装置结构后，将其导入 ADAMS 动力学仿真软件进行运动学分析。通过模拟实际作业过程中锤片的运动轨迹，以寻求最优的破碎装置销轴数量以及最优的线速比。

通过改变破碎装置的销轴数量，寻找不同销轴数量时破碎装置最优线速比，3 销轴至 8 销轴破碎装置最优线速比时的锤片运动轨迹如图 5 所示。

试验数据（表 1）显示，随着销轴数量的增加，最优线速比呈现明显的上升趋势，当销轴数量由 3 个增加至 8 个时，对应的最优线速比从 0.39 逐步提升至 0.61。

基于上述运动学仿真分析，对比了不同销轴数量下的装置作业特性。结果表明：当销轴数量增加至 5 个以上时，为达到理想轨迹相切状态，所需的临界线速比 λ 将显著超出常规锤片式破碎机的推荐工作范围，这不仅会导致作业能耗急剧上升，还会加速部件磨损，降低装置使用寿命。综合权衡作业效率、能耗水平及机械可靠性，本研究最终优选 4 销轴结构作为定型方案，并确定其最佳作业线速比为 0.47。该参数的确立为后续针对锤片几何尺寸（长、宽、厚）的精细化设计提供了明确的结构基础与动力学边界条件。

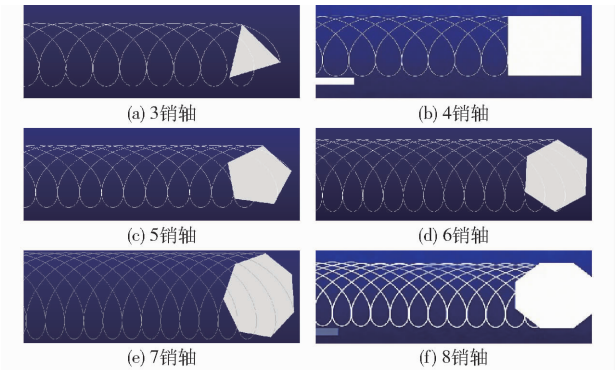


图 5　不同销轴数量时锤片的运动轨迹

Fig. 5　Trajectory of hammers in crushing devices with different numbers of pins

表 1　不同销轴数量的最优线速比

Tab. 1　Optimal line speed ratio for different numbers of pins

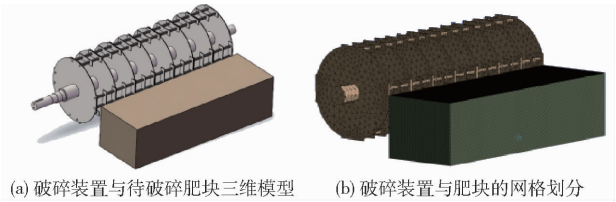
销轴数量/个	3	4	5	6	7	8
线速比	0.39	0.47	0.52	0.55	0.58	0.61

2　破碎装置仿真模型建立

2.1　破碎装置有限元模型

为获取破碎装置工作过程中的应力分布及变形规律，对其进行强度设计。首先对撒肥机模型进行合理简化，再利用仿真软件模拟实际撒肥工况。

锤片破碎肥块的过程属于非线性结构瞬态响应过程。因此，需对锤片接触肥块时所受应力情况进行校核，本研究采用 Workbench 软件内置的显式动力学（Explicit Dynamics）模块，模拟锤片破碎肥块的过程，并得到肥块破碎过程中锤片应力应变等变化趋势。破碎装置与待破碎肥块的三维模型及网格划分结果如图 6a、6b 所示。仿真中，将肥块模型定义为弹脆性材料，破碎装置选用 Q235 钢，该材料具备优良的刚度、强度及耐磨性，且硬度远大于肥块模型。



(a) 破碎装置与待破碎肥块三维模型　(b) 破碎装置与肥块的网格划分

图 6　破碎装置破碎模型

Fig. 6　Crushing device crushing models

2.2 破碎装置离散元模型

本研究的仿真对象为牛粪堆肥，其固体颗粒由丝状颗粒构成，其中粒径 2.0 ~ 4.0 mm 的颗粒质量占比最大。为缩短仿真时间、提升计算效率[20]，本研究将固体牛粪颗粒简化为直径 5 mm 的单球型颗粒模型，牛粪堆肥颗粒仿真模型如图 7 所示，粪肥及抛撒装置的相关参数如表 2 所示。

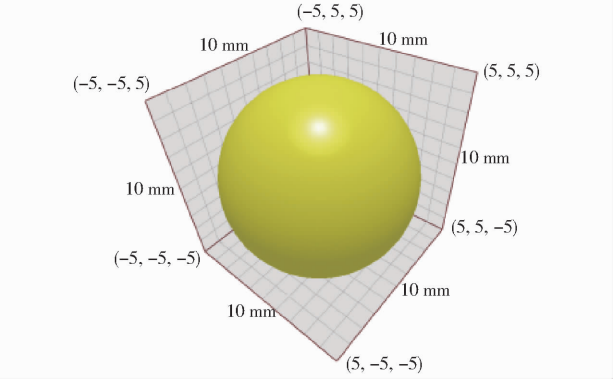


图 7 仿真试验粪肥颗粒模型

Fig. 7 Simulation experiment of fertilizer pellet model

为模拟牛粪堆肥的真实物理特性，在颗粒间引入 Bonding[21-22] 接触模型，该模型通过粘结键将球体颗粒联结，可实现有限数量特定尺寸颗粒向更大团聚体颗粒的粘结成型，且所形成的粘结结构能够抵抗法向与切向运动。为更贴合实际工况，进一步设置两种不同类型的粘结键，分别模拟粪肥自身的粘结特性及粪肥中混杂砂石的粘结状态。粪肥与砂石的相关参数如表 3 所示。

3 破碎性能仿真分析与试验验证

3.1 锤片结构强度分析

图 8 为破碎装置破碎肥料时的应力-时间变化分布图，由图可明确破碎装置与待破碎肥料相互作用过程中的应力变化规律。

表 2 粪肥与抛撒装置相关参数

Tab. 2 Manure and spreading device parameters

项目	参数	数值
固态粪肥	剪切模量/Pa	1.00×10^{6}
	泊松比	0.25
	密度/(kg·m^{-3})	620
传送带	剪切模量/Pa	1.058×10^{8}
	泊松比	0.45
	密度/(kg·m^{-3})	1 300
Q235 钢	剪切模量/Pa	7.94×10^{10}
	泊松比	0.30
	密度/(kg·m^{-3})	7 850
固态粪肥-固态粪肥	恢复系数	0.60
	静摩擦因数	0.65
	滚动摩擦因数	0.10
固态粪肥- Q235 钢	恢复系数	0.60
	静摩擦因数	0.70
	滚动摩擦因数	0.11
固态粪肥-传送带	恢复系数	0.40
	静摩擦因数	0.234
	滚动摩擦因数	0.05

表 3 粪肥与砂石相关参数

Tab. 3 Parameters related to manure and stones

项目	单位面积法向刚度/(N·m^{-3})	单位面积剪切刚度/(N·m^{-3})	临界法向应力/Pa	临界切向应力/Pa
粪肥-粪肥	1.127×10^{8}	4.17×10^{7}	3.4×10^{6}	1.25×10^{6}
砂石-砂石	1×10^{9}	5.10×10^{9}	5×10^{5}	5×10^{5}

图 9 为锤片在破碎肥料时的应力-时间变化分布图，由图可明确锤片与待破碎肥料相互作用过程

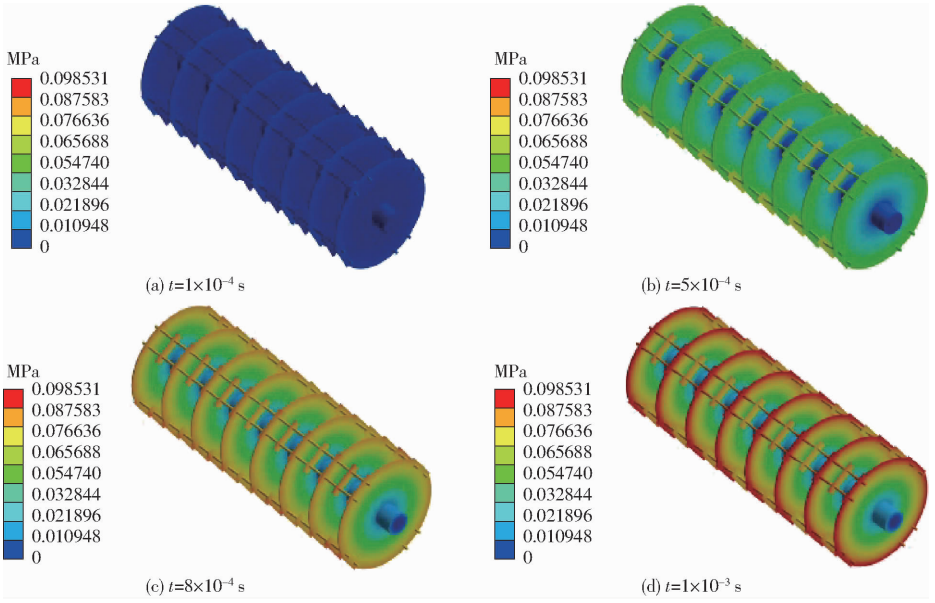


图 8 破碎装置所受应力随时间变化分布图

Fig. 8 Distribution diagrams of stress on crushing device over time

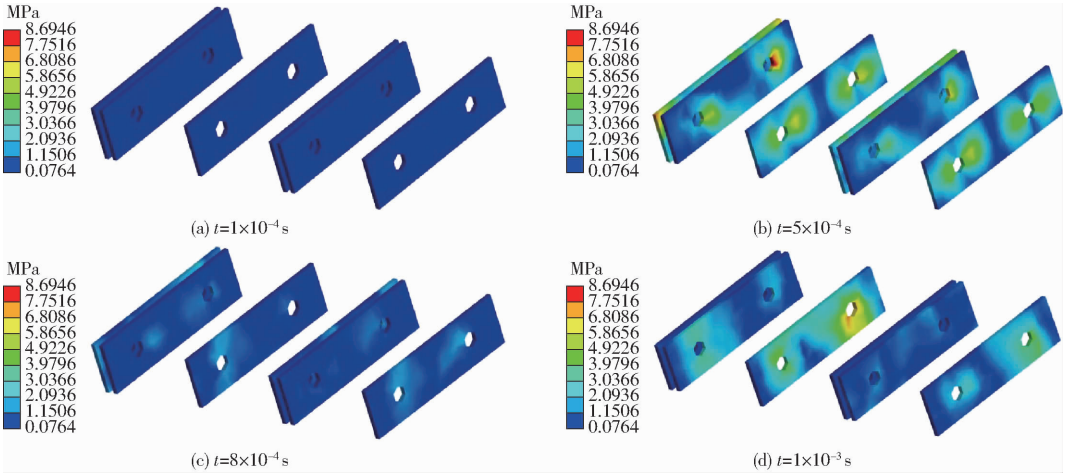


图 9　锤片所受应力随时间变化分布图

Fig. 9　Distribution diagrams of stress on hammer plate over time

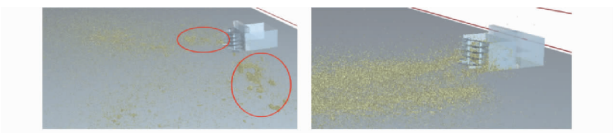
中的应力变化规律。

由材料力学知识可知，所选 45 号钢锤片的抗压强度（σ_{bc} = 600 MPa）和屈服强度（σ_s = 355 MPa）均显著高于作业中承受的最大应力（8.69 MPa），其安全系数 $n = \sigma_s/\sigma_{max} \approx 41$ 完全满足破碎装置的强度设计要求，验证了材料选型的合理性。

3.2　破碎效果仿真分析

为验证固态粪肥破碎装置的作业可行性，开展对比试验研究，采用无破碎装置的抛撒模型与含破碎装置的抛撒模型进行抛撒试验，对比两次试验的肥料破碎效果及抛撒均匀度。

破碎效果对比如图 10 所示。试验结果表明：当采用无破碎装置的抛撒模型时，抛撒物中存在大量未破碎的肥块及砂石（图 10a）；当采用含破碎装置的抛撒模型时，抛撒出的肥料中几乎无未破碎肥块，物料分散均匀，更符合实际农业种植的农艺要求，如图 10b 所示。



(a) 不含破碎装置时抛撒结果　(b) 含有破碎装置时抛撒结果

图 10　抛撒对比试验

Fig. 10　Drop scattering tests

为定量分析两者的破碎效果，肥料模型粘结键破碎数量随时间变化情况如图 11 所示。试验结果表明：装配破碎装置的撒肥模型，其肥料粘结键破碎数量远高于无破碎装置的撒肥模型。这一结果证实，破碎装置可有效提升肥料破碎程度，能避免肥料未破碎即被抛出的问题，同时可防止撒肥机出肥口堵塞，保障作业顺畅性。

肥料模型破碎效果如表 4 所示。当撒肥模型未装配破碎装置时，肥块破碎率为 57.1%，砂石破碎率为 25.1%，总破碎率为 50.2%；当撒肥模型装配破碎装置后，肥块破碎率达到了 92.4%，砂石破碎率达到了 72.4%，总破碎率达到了 90.8%，破碎效果得到了提高，反映了粪肥撒肥机破碎装置的可行性。

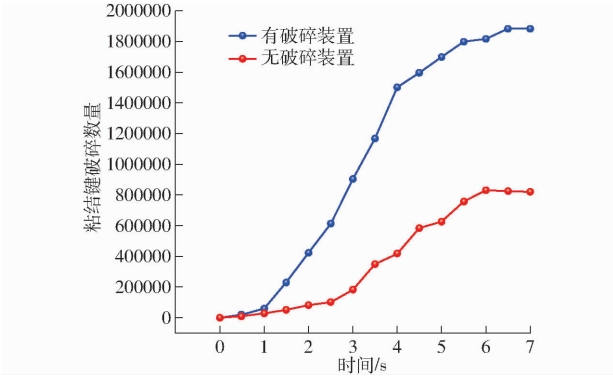


图 11　粘结键破碎数量随时间变化曲线

Fig. 11　Trend of number of bond failures over time

表 4　肥料模型破碎效果

Tab. 4　Fertilizer model crushing effect

抛撒模式	肥块模型粘结键破碎数量	砂石模型粘结键破碎数量	肥块破碎率/%	砂石破碎率/%	总破碎率/%
无破碎装置	8.06×10^5	2.23×10^5	57.1	25.1	50.2
有破碎装置	1.77×10^6	5.70×10^5	92.4	72.4	90.8

3.3　关键参数多目标优化

3.3.1　单因素试验

为探究破碎装置锤片各因素对撒肥过程中碎肥效果的影响，对锤片长度、锤片宽度、锤片厚度、孔边距和孔径 5 个关键因素分别进行单因素试验。通过查阅文献[23－25]选取各影响因素的取值范围，具体数值见表 5。肥料模型随时间变化的状态见图 12。

表 5 试验因素水平

Tab. 5 Test factors and levels mm

水平	锤片长度	锤片宽度	锤片厚度	孔边距	孔径
1	170	45.0	3	30	15.5
2	175	47.5	4	35	18.0
3	180	50.0	5	40	20.5
4	185	52.5	6	45	23.0
5	190	55.0	7	50	25.5

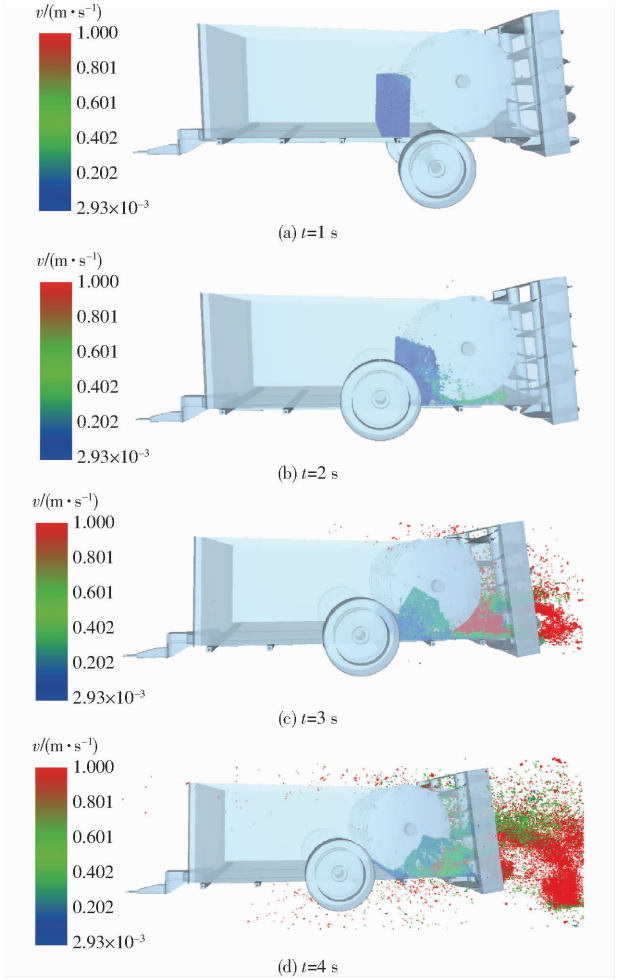


图 12 仿真试验肥料状态

Fig. 12 Simulation experiment fertilizer status

以肥料破碎率和肥料损失率为评价指标，通过对比不同试验组的指标差异，分析锤片长度、锤片宽度、锤片厚度、孔边距及孔径对碎肥效果的影响规律，仿真结果如图 13 所示。

由上述单因素试验结果可以得知：当锤片长度达到 180 mm 时破碎装置破碎效果最好，肥料损失率随着锤片长度增加呈上升趋势；肥料的破碎率随锤片宽度的增长呈上升趋势，当锤片宽度达到 47.5 mm 时，肥料的损失率最小；当锤片厚度达到 4 mm 时破碎装置破碎效果最好，且肥料的损失率最小；当孔边距达到 40 mm 时破碎装置破碎效果最好，当孔边距达到 45 mm 时肥料损失率最小；当孔径达到 23 mm 时破碎装置破碎效果最好，肥料损失率随着孔径的增加呈上升趋势。

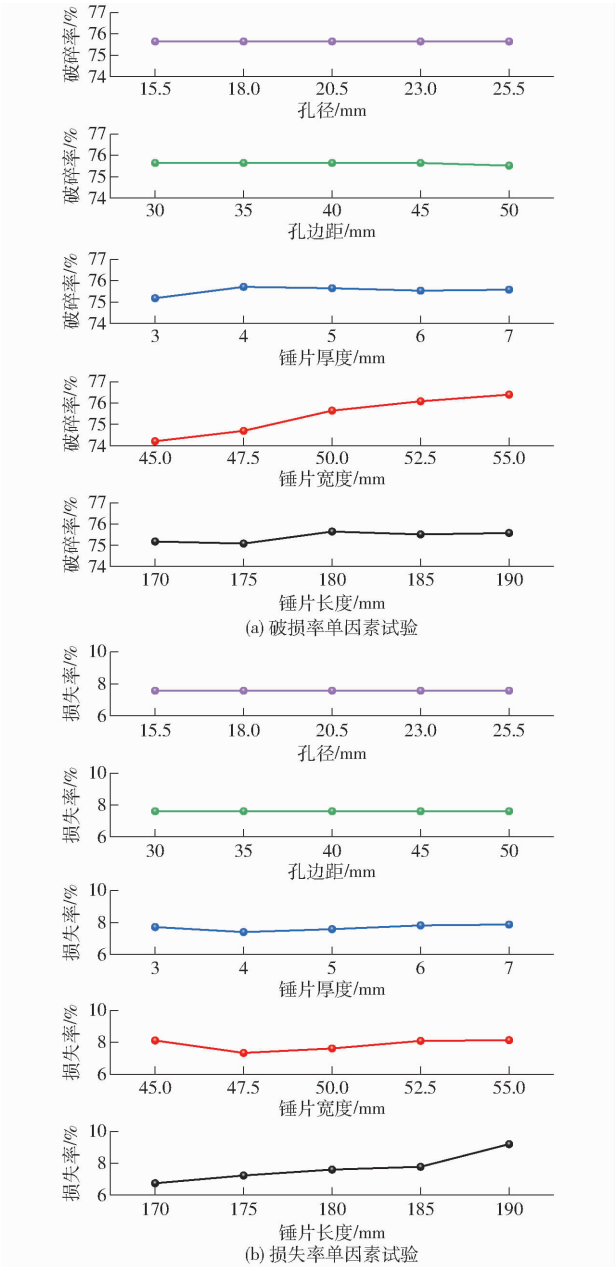


图 13 单因素试验结果

Fig. 13 Single factor experimental results

3.3.2 多因素试验

为进一步探究破碎装置的振动规律并确定最佳工作参数，基于相关文献研究[26-27]及 3.3.1 节单因素试验数据，本次正交试验优化研究选取影响破碎装置工作性能的关键工艺参数开展系统优化。通过前期试验分析，剔除对工作性能影响不显著的孔径、孔边距参数，确定锤片长度、锤片宽度及锤片厚度为核心优化参数。试验采用三因素三水平响应面法设计，具体变量及水平设置如下：锤片长度选取 175、180、185 mm；锤片宽度选取 45.0、47.5、50.0 mm；锤片厚度选取 3、4、5 mm。因素编码如表 6 所示。试验方案及结果见表 7。

表 6　试验因素编码

Tab. 6　Coding of experimental factors　mm

编码	因素		
	锤片长度	锤片宽度	锤片厚度
-1	175	45.0	3
0	180	47.5	4
1	185	50.0	5

表 7　试验方案及结果

Tab. 7　Test scheme and results

序号	因素			破碎率/%	损失率/%
	锤片长度/mm	锤片宽度/mm	锤片厚度/mm		
1	175	47.5	5	74.71	6.97
2	185	47.5	3	75.01	7.56
3	180	45.0	5	74.20	8.10
4	175	47.5	3	74.63	7.10
5	185	45.0	4	74.44	8.46
6	180	47.5	4	75.25	7.55
7	180	47.5	4	75.23	7.32
8	175	45.0	4	74.18	8.41
9	175	50.0	4	75.39	6.87
10	180	45.0	3	74.54	7.95
11	185	47.5	5	74.92	8.15
12	180	50.0	3	75.15	7.73
13	180	50.0	5	75.66	7.60
14	180	47.5	4	75.24	7.44
15	185	50.0	4	75.85	7.33

通过对多因素试验的性能指标进行统计分析，得出各目标参数平均值：平均破碎率为 74.96%，平均损失率为 7.64%。试验数据表明，在最优单因素条件下，各性能指标均表现出良好的稳定性，其变异系数分别为 0.65% 和 6.26%。

采用 Design-Expert 12 软件对各性能指标进行响应面分析，通过引入约束条件对目标函数进行优化求解，最终获得锤片式破碎装置的最优工艺参数组合。基于方差分析的破碎率模型检验结果如表 8 所示，表中 A、B、C 为因素编码值。

构建破碎率 Y_1 的二次回归方程

$$Y_1 = -1\,395.457 - 0.106A - 0.269B - 3.678C + 0.50AB - 0.045AC + 0.020BC - 0.175A^2 - 0.106B^2 - 0.248C^2 \quad (12)$$

该数学模型能有效表征关键工艺参数：锤片长度、锤片宽度和锤片厚度与破碎率指标之间的非线性关系，经显著性检验，即 $P < 0.01$，证实模型具有统计学意义，其决定系数 R^2 达 0.988，表明模型可解释 98.8% 的响应值变异，验证了模型的预测可靠性。

方差分析结果表明，构建的破碎率模型，F 值为 44.96，P 值为 0.000 3，具有高度显著性。其中，锤片长度、锤片宽度、交互作用 BC、二次项 A^2 和 C^2 的 P 值小于 0.05，对响应值的影响比较显著，而因素锤片厚度和其他交互项的 P 值大于 0.05，对响应值的影响不显著。

表 8　正交试验模型方差分析

Tab. 8　Orthogonal test model analysis of variance

方差来源	破碎率				损失率			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	3.50	9	44.96	0.000 3	2.75	9	2.22	0.196 1
A	0.215 5	1	24.91	0.004 1	0.577 8	1	4.21	0.095 3
B	2.75	1	318.06	<0.000 1	1.44	1	10.48	0.023 0
C	0.003 1	1	0.356 1	0.576 7	0.028 8	1	0.210 0	0.666 0
AB	0.009 9	1	1.14	0.333 6	0.042 0	1	0.306 5	0.603 7
AC	0.007 6	1	0.874 8	0.392 6	0.129 6	1	0.945 2	0.375 6
BC	0.179 4	1	20.73	0.006 1	0.019 6	1	0.142 9	0.720 9
A^2	0.108 6	1	12.55	0.016 5	0.004 2	1	0.030 7	0.867 8
B^2	0.039 7	1	4.59	0.085 0	0.495 3	1	3.61	0.115 8
C^2	0.227 1	1	26.25	0.003 7	0.007 1	1	0.051 5	0.829 4
残差	0.043 3	5			0.685 6	5		
失拟项	0.043 2	3	293.62	0.003 4	0.659 1	3	16.61	0.057 3
误差	0.000 1	2			0.026 4	2		
总和	3.54	14			3.43	14		

为了提高参数对模型的影响显著性，故剔除不显著的交互项 AB、AC 后得到简化模型，如表 9 所示。同时简化了破碎率的二次回归方程

$$Y_1 = 69.781 + 12.510A + 3.682B - 2.020C + 0.213BC - 0.175A^2 - 0.106B^2 - 0.248C^2 \quad (13)$$

优化后的模型仍保持高度显著性，F 值为

57.36，P 小于 0.000 1，R^2 = 0.982 9，仅较全模型下降 0.49%，表明简化后的模型仍具有优异的预测能力。其中，模型的 F 值显著提高，从 44.96 提升至 57.36，说明模型精简后对结果的解释力更强，并且总误差较低，仅为 0.000 1，说明试验数据可靠性良好。

表 9 优化后破碎率方差分析

Tab.9 Variance analysis of optimized crushing rate

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	3.48	7	57.36	<0.000 1
A	0.215 5	1	24.84	0.001 6
B	2.75	1	317.20	<0.000 1
C	0.003 1	1	0.355 1	0.570 0
BC	0.179 4	1	20.67	0.002 6
A^2	0.108 6	1	12.52	0.009 5
B^2	0.039 7	1	4.58	0.069 6
C^2	0.227 1	1	26.18	0.001 4
残差	0.060 7	7		
失拟项	0.060 6	5	247.47	0.004 0
误差	0.000 1	2		
总和	3.54	14		

结果表明，锤片宽度 B 的影响最显著，F 值大于 300，其次是锤片长度 A 和二次项 C^2。通过模型优化，在保证预测精度的前提下简化了模型结构，为工艺参数优化提供了更高效的数学模型。

基于方差分析优化后的损失率模型检验结果如表 10 所示。基于响应面法的试验数据分析表明，优化后的二次回归模型具有统计学显著性，F 值为 5.49，P 值为 0.013 6，决定系数 R^2 为 0.753 1，表明该模型能够解释 75.31% 的响应值变异。通过分析影响参数可知，锤片长度 A 和锤片宽度 B 对损失率具有显著影响，即 P 值小于 0.05，其中锤片宽度的影响效果最显著，F 值为 15.26，P 值为 0.003 6。此外，锤片宽度二次项 B^2 也表现出显著影响，F 值为 5.30，P 值为 0.046 8，表明其与响应值之间存在非线性关系。

表 10 优化后损失率方差分析

Tab.10 Variance analysis of loss rate after optimization

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	2.58	5	5.49	0.013 6
A	0.577 8	1	6.14	0.035 1
B	1.44	1	15.26	0.003 6
C	0.028 8	1	0.306	0.593 6
AB	0.042 0	1	0.446 6	0.520 7
B^2	0.498 8	1	5.30	0.046 8
残差	0.847 0	9		
失拟项	0.820 5	7	8.86	0.105 1
误差	0.026 4	2		
总和	3.43	14		

构建优化后的损失率的二次回归方程

$$Y_2 = 8.343 - 0.230A - 1.750B + 0.060C + 0.100AB + 0.363B^2 \quad (14)$$

对优化后的结果进行响应面分析，如图 14a 所示，破碎率随锤片宽度增加而呈现增长趋势，此外，随着锤片厚度的增加，破碎率呈现出先增加后下降的趋势，变化拐点在锤片厚度为(4.1 ± 0.2) mm 时出现，这是由于随着锤片厚度的增加，锤片对肥料的冲击力会提高，因此肥料的破碎率增加，锤片厚度在(4.1 ± 0.2) mm 范围外以后，其对肥料的剪切作用会下降，因此肥料的破碎率下降。如图 14b 所示，损失率随锤片长度增加而呈现增长趋势，随着锤片宽度的增加，损失率呈现下降的趋势。

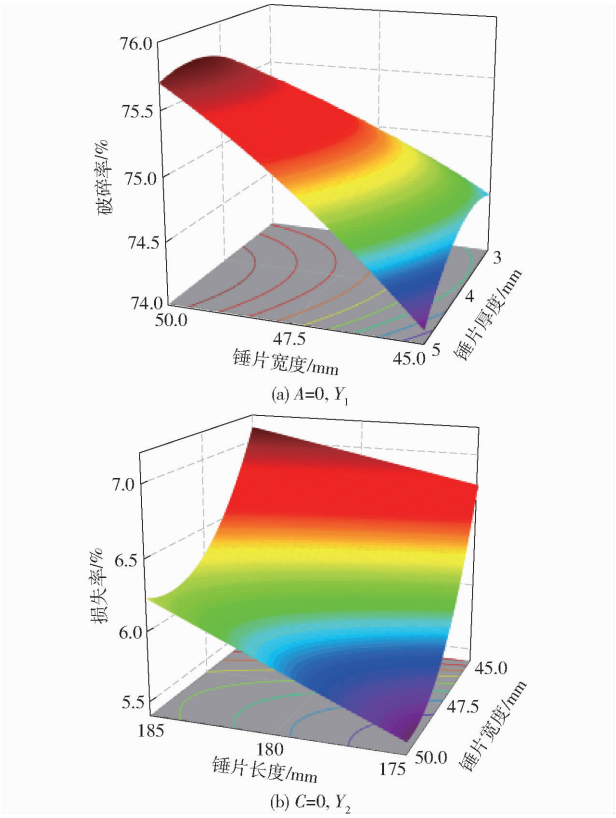


图 14 各影响因素交互对破碎率和损失率影响的响应曲面

Fig. 14 Response surfaces illustrating interaction effects of various influencing factors on fragmentation rate and loss rate

锤片的优化目标为破碎率尽可能大，而损失率尽可能小，如图 14 优化后，锤片的长、宽及厚度分别为 177、47.5、4.4 mm。破碎装置在工作时，其对结块肥料和砂石的破碎率可达 75.59%，而肥料的损失率可降低至 7.18%。

3.4 田间试验

为了验证优化设计后的破碎装置在实际作业中的效果，开展田间对比试验，其核心目的在于通过标准化的测试流程，定量分析该装置关键性能的具体

数值，即破碎率与损失率的具体结果。

于 2025 年 10 月 31 日在西北农林科技大学机械与电子工程学院试验田进行有机肥破碎装置性能对比试验。试验地地面平整，动力机械采用 29.42 kW 拖拉机，试验样机主要由液压变速阀、液压马达、肥料抛撒装置、肥料输送装置、肥料破碎装置等组成，如图 15 所示。



图 15　试验样机

Fig. 15　Experimental prototype

试验用肥为经过高温发酵后的牛粪堆肥，试验前不经过粉碎等处理，发酵时间约为 45 d，物料堆积密度约 550 kg/m^3，含水率为 45%（属于典型的湿黏难破碎工况）。为定量分析破碎装置对作业效果的影响，本试验设置安装破碎装置的试验组与未安装破碎装置的对照组，采用多次重复的试验设计，每组重复 3 次。用于收集破碎肥料的收集盒共计 10 个，平均分布在撒肥机后端，如图 16 所示。试验过程中，为精确控制变量，设备的工作转速、离地高度、单次投料量、环境条件等均保持一致，且全部试验由同一操作人员完成。



图 16　有机肥破碎抛撒试验

Fig. 16　Organic fertilizer crushing and spreading experiment

每组试验完成后，对收集到的有机肥进行装袋称量，记录数据并计算有机肥的破碎率及损失率，其计算公式为

$$C_R = M_c / M_t \times 100\% \tag{15}$$

$$L_R = [M_t - (M_c + M_u)] / M_t \times 100\% \tag{16}$$

式中　C_R——破碎率，%

M_c——筛下合格物料质量，kg

M_t——试验投料总质量，kg

L_R——损失率，%

M_u——未通过筛网的物料质量，kg

具体结果如表 11 所示。

表 11　破碎装置试验结果

Tab. 11　Crusher device experimental results　%

序号	理论破碎率	实际破碎率	破碎率相对误差	理论损失率	实际损失率	损失率相对误差
1		82.12	8.64		8.97	25.10
2	75.59	80.07	5.93	7.17	10.02	39.70
3		80.13	6.01		6.74	6.00
平均值		80.77	6.85		8.58	23.60

田间试验表明，所研制撒肥机破碎装置实际破碎率均值为 80.77%，同等工况下较无前置破碎结构的传统撒肥装置提升 25%，与仿真预测值均值相对误差为 6.85%，且实测破碎率略高于理论预测值，原因是田间作业中整机振动与肥料颗粒不规则二次碰撞的协同作用，从而强化了物料离散破碎效果。从肥料损失率看，受田间路况复杂性及有机肥颗粒特性不均质性影响，实际损失率与理论损失率相对误差均值为 23.60%，且实际平均损失率仅 8.58%，可以满足农业中对固体有机肥的使用需求。综上，该破碎装置实现了 80.77% 的高效破碎与 8.58% 的低损失，有效解决了固态有机肥抛撒堵塞难题，表现出优异的作业可靠性与环境适应性，为其机械化高效抛撒提供了技术支撑。

4　结论

（1）通过对破碎装置的强度设计以及对破碎装置工作时的动力学分析，确定了破碎装置的总体结构以及对破碎装置破碎效果的影响因素。其中装置主轴半径 60 mm，销轴数量为 4，线速比为 0.47，影响因素包括锤片长度、锤片宽度和锤片厚度。

（2）通过离散元仿真，以肥料抛撒后的破碎率和损失率为评价指标，对锤片长度、锤片宽度和锤片厚度进行了最优工作参数求解，锤片的优化目标为破碎率尽可能大，而损失率尽可能小，优化后，锤片的长、宽及厚度分别为 177、47.5、4.4 mm。破碎装置在工作时，其对结块肥料和砂石的破碎率可达

75.59%,而肥料的损失率可降低至7.18%。

(3)田间试验验证了该破碎装置在处理含水率约45%的典型湿黏固态粪肥时的作业适应性。结果表明,所设计装置能够有效缓解高湿物料易结块、易堵塞等问题,改善物料破碎与连续输送效果,表现出较好的田间作业可靠性。在典型工况下,平均物料损失率控制在10%以内,说明该装置能够满足湿黏固态粪肥田间破碎作业需求。

参 考 文 献

[1] 李连豪, 张振, 秦伟桦, 等. 基于 EDEM 的无轴螺旋式排肥器设计与试验[J]. 河南农业大学学报, 2025, 59(6): 1066 – 1075.
Li Lianhao, Zhang Zhen, Qin Weihua, et al. Design and experiment of shaftless screw fertilizer discharger based on EDEM[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2025, 59(6): 1066 – 1075. (in Chinese)

[2] 刘京辉, 郭延超, 王笑乐, 等. 液态粪肥分配器多路流动均匀性优化设计[J]. 拖拉机与农用运输车, 2025(3): 56 – 66.
Liu Jinghui, Guo Yanchao, Wang Xiaole, et al. Optimal design for multi-channel flow uniformity of liquid manure distributor [J]. Tractor & Farm Transporter, 2025(3): 56 – 66. (in Chinese)

[3] Wang Shengye, Fu Xiang, Deng Xiaogang. Higher-order aerodynamic numerical simulations in compressible RANS framework with inverse-ω scale variable[J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 131: 107971.

[4] Su Xing, Shao Xiaolu, Geng Yining, et al. Optimization of feedstock and insulating strategies to enhance biogas production of solar-assisted biodigester system[J]. Renewable Energy, 2022, 197: 59 – 68.

[5] 吕金庆, 孙玉凯, 李忠远, 等. 有机肥立式撒肥装置抛撒机理分析与试验[J]. 东北农业大学学报, 2021, 52(10): 66 – 77.
Lyu Jinqing, Sun Yukai, Li Zhongyuan, et al. Dispersal mechanism analysis and test of vertical fertilizer dispersing device for organic fertilizer[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2021, 52(10): 66 – 77. (in Chinese)

[6] 程韦武, 庞莲香, 蓝同平. 螺旋输送机的设计[J]. 现代制造技术与装备, 2018(4): 1 – 3.
Cheng Weiwu, Pang Lianxiang, Lan Tongping. Design of screw conveyor [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2018(4): 1 – 3. (in Chinese)

[7] 付静, 张富贵, 曾以明, 等. 基于 EDEM 的有机肥排肥性能分析与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(12): 51 – 57.
Fu Jing, Zhang Fugui, Zeng Yiming, et al. Analysis and experiment on organic fertilizer discharging performance based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(12): 51 – 57. (in Chinese)

[8] 邹子岳, 余洪锋, 樊成赛, 等. 基于模型预测控制的有机肥双变量排肥策略研究与试验[J]. 南京农业大学学报, 2025, 48(1): 1 – 16.
Zou Ziyue, Yu Hongfeng, Fan Chengsai, et al. Experiment and research on bivariate discharge strategy of organic fertilizer based on model predictive control[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2025, 48(1): 1 – 16. (in Chinese)

[9] 王鑫鹏, 史江全, 李向前, 等. 国内外有机施肥机研究现状与发展趋势分析[J]. 农业开发与装备, 2025(4): 100 – 103.
Wang Xinpeng, Shi Jiangquan, Li Xiangqian, et al. Analysis of research status and development trends of organic fertilizer applicators at home and abroad[J]. Agricultural Development & Equipments, 2025(4): 100 – 103. (in Chinese)

[10] 闫建, 朱佩佩, 涂彬, 等. 固态有机肥与复合肥混合施肥机设计与试验[J]. 农业工程, 2024, 14(12): 97 – 103.
Yan Jian, Zhu Peipei, Tu Bin, et al. Design and experiment of mixed fertilizer applicator of solid organic fertilizer and compound fertilizer[J]. Agricultural Engineering, 2024, 14(12): 97 – 103. (in Chinese)

[11] 王辛政. 自走式固体有机肥收集抛撒机的设计与试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
Wang Xinzheng. Design and experiment of a self-propelled solid organic fertilizer collection and spreading machine[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[12] 胡永光, 杨叶成, 肖宏儒, 等. 茶园施肥机离心撒肥过程仿真与参数优化[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 77 – 82.
Hu Yongguang, Yang Yecheng, Xiao Hongru, et al. Simulation and parameter optimization of centrifugal fertilizer spreader for tea plants[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 77 – 82. (in Chinese)

[13] 谭辰. 果园有机肥条铺机设计与试验[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
Tan Chen. Design and experiment of an orchard organic fertilizer band spreader[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)

[14] 周文琪, 刘淮玉, 李郡凯, 等. 双通道斜置式撒肥叶片单圆盘离心式变量撒肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2026, 57(11): 257 – 268.
Zhou Wenqi, Liu Huaiyu, Li Junkai, et al. Design and experiment of single-disc centrifugal variable-rate fertilizer spreader with double-channel inclined spreading blades[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(11): 257 – 268. (in Chinese)

[15] 丁友强, 祁兵, 王云霞, 等. 基于时空耦合补偿的处方图式稻麦变量施肥系统研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(12): 279 – 288.
Ding Youqiang, Qi Bing, Wang Yunxia, et al. Prescription-map variable fertilization system for rice and wheat based on

spatiotemporal coupling compensation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 279 – 288. (in Chinese)

[16] 王金峰, 吕振阳, 赵敏义, 等. 基于处方图的水稻侧深变量施肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 151 – 162.
Wang Jinfeng, Lü Zhenyang, Zhao Minyi, et al. Design and experiment of rice side-deep variable-rate fertilization control system based on prescription diagrams[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 151 – 162. (in Chinese)

[17] 陈桂斌, 王庆杰, 李洪文, 等. 固体有机肥破碎条施机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 13 – 24.
Chen Guibin, Wang Qingjie, Li Hongwen, et al. Design and experiment of solid organic fertilizer crushing and striping machine[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(11): 13 – 24. (in Chinese)

[18] 马攀宇. 山地果园仿形割草机的设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
Ma Panyu. Design and experiment of a profiling mower for mountain orchards[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[19] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册: 下册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.

[20] 牛其强, 王保兴, 董和银, 等. 自走式全混合日粮制备机取料仿真与参数优化[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(10): 99 – 106.
Niu Qiqiang, Wang Baoxing, Dong Heyin, et al. Simulation and parameter optimization of forage taking for self-propelled total mixed ration preparation machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(10): 99 – 106. (in Chinese)

[21] 袁全春, 徐丽明, 邢洁洁, 等. 机施有机肥散体颗粒离散元模型参数标定[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 21 – 27.
Yuan Quanchun, Xu Liming, Xing Jiejie, et al. Parameter calibration of discrete element model of organic fertilizer particles for mechanical fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 21 – 27. (in Chinese)

[22] 程红胜, 张泽涵, 沈玉君, 等. 分层近根式液体粪肥施肥铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 98 – 107.
Cheng Hongsheng, Zhang Zehan, Shen Yujun, et al. Design and experiment of layered near-root liquid manure fertilization shovel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 98 – 107. (in Chinese)

[23] 孟杰, 孟文俊. 影响 EDEM 仿真结果的因素分析[J]. 机械工程与自动化, 2014(6): 49 – 51.
Meng Jie, Meng Wenjun. Analysis of factors affecting EDEM simulation results[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2014(6): 49 – 51. (in Chinese)

[24] 李骅, 孟煜柏, 齐新丹, 等. 基于 Bonding V2 模型的蒜种离散元建模与参数标定[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 150 – 157, 169.
Li Hua, Meng Yubai, Qi Xindan, et al. Discrete element modeling and parameter calibration of garlic seed based on Bonding V2 model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 150 – 157, 169. (in Chinese)

[25] 左杰文, 孙成龙, 卢富运, 等. 基于离散元的燕麦籽粒揉搓装置仿真分析[J]. 农机化研究, 2022, 44(9): 196 – 201.
Zuo Jiewen, Sun Chenglong, Lu Fuyun, et al. Simulation analysis of oat grain rubbing device based on discrete element method[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(9): 196 – 201. (in Chinese)

[26] 祁晓敏. 多功能牧草粉碎机关键机构的设计及制造工艺研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2016.
Qi Xiaomin. Design of key mechanisms and study on manufacturing process for multifunctional forage crusher[D]. Shihezi: Shihezi University, 2016. (in Chinese)

[27] Li Duanle, Wang Dongmin, Ren Caifu, et al. Investigation of rheological properties of fresh cement paste containing ultrafine circulating fluidized bed fly ash[J]. Construction and Building Materials, 2018, 188: 1007 – 1013.